

电机学

三相异步电动机的起动和调速

东南大学电气工程学院

黄允凯



东南大学
电气工程学院



1

起动电流和起动转矩

2

谐波转矩及其对起动的影响

3

笼型异步电动机的起动

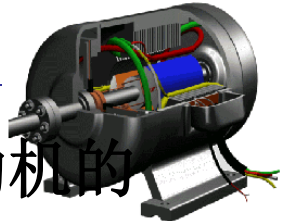
4

笼型异步电动机的调速

5

绕线转子异步电动机的起动和调速





起动：从静止不动到加速到工作转速的过程，异步电动机的
起动性能

1. 起动电流倍数
2. 起动转矩倍数
3. 起动时间
4. 起动时能量消耗与发热
5. 起动设备的简单性和可靠性
6. 起动中的过渡过程

要求：在起动时有较大的起动转矩（倍数），较小的起动电流（倍数）

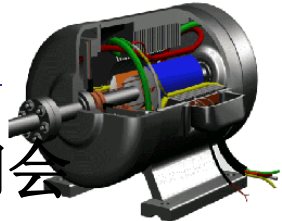
$$I_{st} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad T_{st} = \frac{m_1 p}{\omega_1} U_1^2 \frac{r_2'}{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

现实情况：起动电流大，约为额定电流的5-7倍，起动转矩并不大，只有额定转矩的1-2倍

起动电流大会带来什么不好的影响？

如何改善异步电动机的起动性能？





气隙中除了基波磁场外，还有一系列的谐波磁场，它们会产生附加损耗、**谐波转矩**，引起电机的振动和噪声

本节讨论**高次空间谐波磁场**的产生及由此产生的谐波转矩，分析其对电机起动的影响及消弱其影响所采取的方法

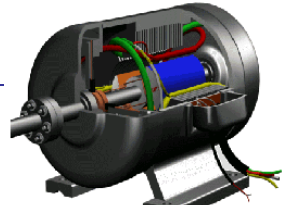
• 异步电机的高次谐波磁场产生的主要原因

1、绕组分布非正弦引起的谐波磁场

$$F_{mv} = \frac{3}{2} 0.9 s q \frac{k_{wv}}{vp} I_1, \quad p_v = vp, \quad n_v = \pm \frac{n_1}{v}$$

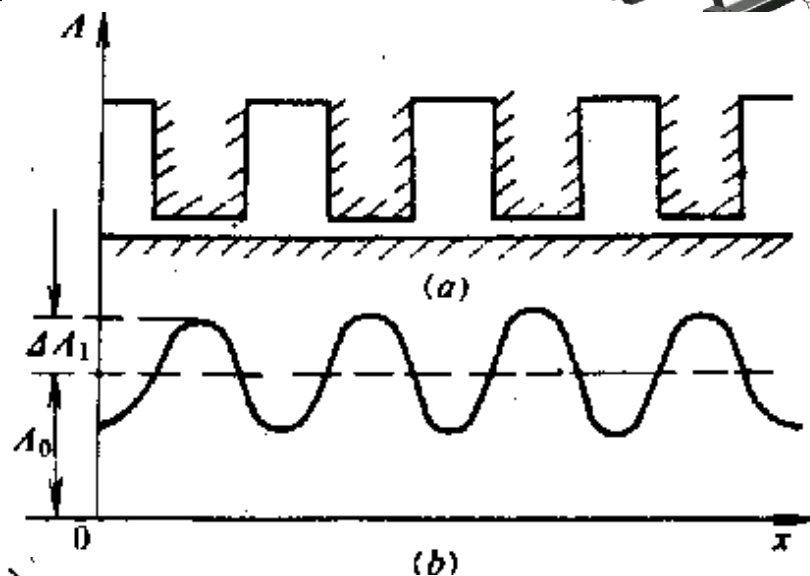
定子齿谐波： $2mqk \pm 1$ 次谐波与定子齿数有关，与基波绕组因数相同，有较大的谐波磁势。





2、定、转子齿槽存在引起磁导齿谐波
 假设只有定转子表面只有一侧有齿槽
 面对齿部磁导较大
 面对槽口磁导较小

$$\Lambda = \Lambda_0 + \Delta\Lambda_1 \sin \frac{Z_1}{p} x$$



$$B_1(x, t) = \left[\Lambda_0 + \Delta\Lambda_1 \sin \frac{Z_1}{p} x \right] F_1 \sin(\omega t - x)$$

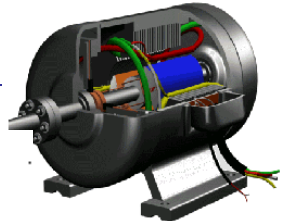
$$= F_1 \Lambda_0 \sin(\omega t - x) + F_1 \cdot \Delta\Lambda_1 \sin(\omega t - x) \sin \frac{Z_1}{p} x$$

$$= \underline{B_{m1} \sin(\omega t - x)} + \underline{B_{mz1} \sin(\omega t - x) \sin \frac{Z_1}{p} x}$$

均匀气隙
基波磁场

气隙磁导齿
谐波磁场





$$B_{mz_1} \sin(\omega t - x) \sin \frac{z_1}{p} x = \frac{B_{mz_1}}{2} \cos \left[\omega t - \left(\frac{z_1}{p} + 1 \right) x \right] \\ - \frac{B_{mz_1}}{2} \cos \left[\omega t + \left(\frac{z_1}{p} - 1 \right) x \right]$$

$$\nu_{z_1} = \frac{z_1}{p} \pm 1$$

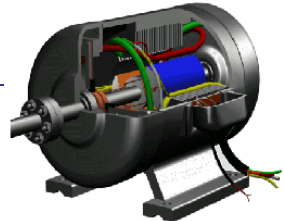
$$p_{\nu z_1} = \nu_{z_1} p = z_1 \pm p$$

$$n_{\nu z_1} = \pm \frac{n_1}{\nu_{z_1}}$$

与绕组一阶齿谐波 ($K=1$) 形式上完全相同, 可把两者合并而统称为定子齿谐波

此外, 电机磁路系统的饱和程度不均匀也会导致谐波磁场





• 高次谐波磁场产生的附加转矩及其对起动的影响

由高次谐波产生的附加转矩，按性质又可分为异步转矩和同步转矩两类。

此两磁场在任何转子转速下都保持同步旋转而相对静止，因而产生平均转矩

异步附加转矩

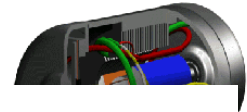
• 异步转矩是由定子旋转磁场与由该磁场感应的转子电流所产生的转子磁场相互作用所产生的转矩，其中只有极对数相同的磁场才会产生异步转矩。

• **异步**：在转子转速不等于同步速时，才会感应转子电流而形成转矩。

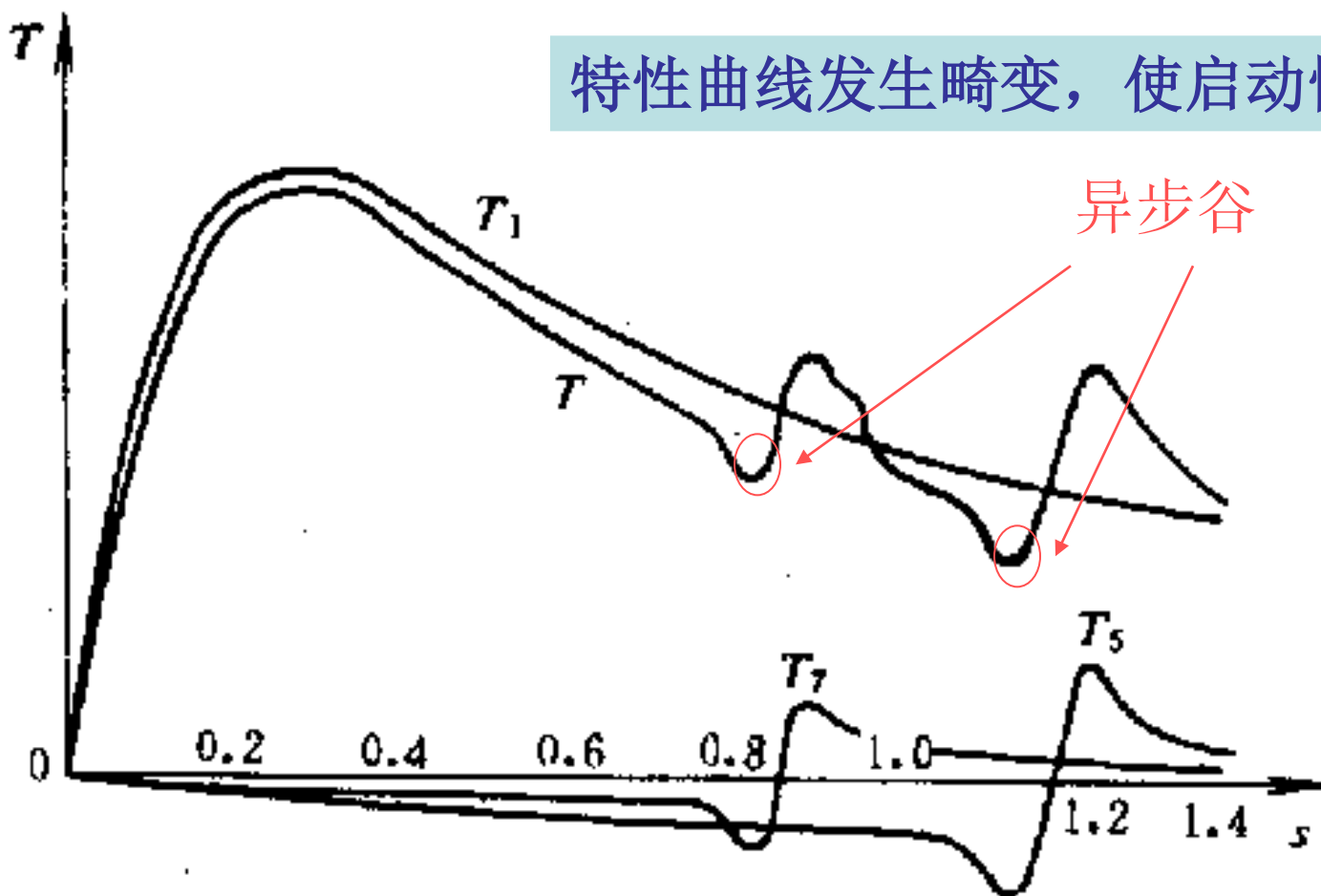
• ν 次谐波转差率

$$s_{\nu} = \frac{\pm \frac{n_1}{\nu} - n}{\pm \frac{n_1}{\nu}} = 1 \mp \nu(1-s)$$





特性曲线发生畸变，使启动性能变坏



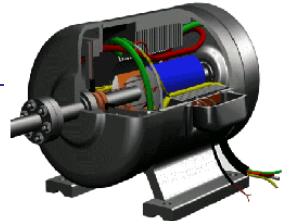
考虑到 5 次谐波及 7 次谐波 后的转矩-转差率特性

分析定子7次谐波: $p_7=7p$, $n_7=n_1/7$, $s_7=7s-6$, 转向为正

当转子转速 $n < n_7 = n_1/7$ 时, $s_7 > 0$, 对于7次谐波相当于处于电动机状态, $T_7 > 0$ 。

当转子转速 $n > n_7 = n_1/7$ 时, $s_7 < 0$, 对于7次谐波相当于处于发电机状态, $T_7 < 0$ 。





同步附加转矩

- 由**独立来源**的极对数相同的两个磁场以相同转速且同方向旋转（当**相对静止**时）而产生的转矩。
- 如定子磁场超前转子磁场，产生正向转矩（电动转矩）。如转子磁场超前定子磁场，便产生反向转矩。如果不是同步旋转，其平均转矩等于零。
- **特点**：两磁场彼此独立，只在某一特定转速下产生同步转矩
- 定子齿谐波磁场和转子齿谐波磁场部是独立的，且磁场较强，如齿槽配合不当，有可能使齿谐波磁场满足极对数相同条件，在**某一特定转速下**形成较强的**同步转矩**。





转速 $n_1/19$

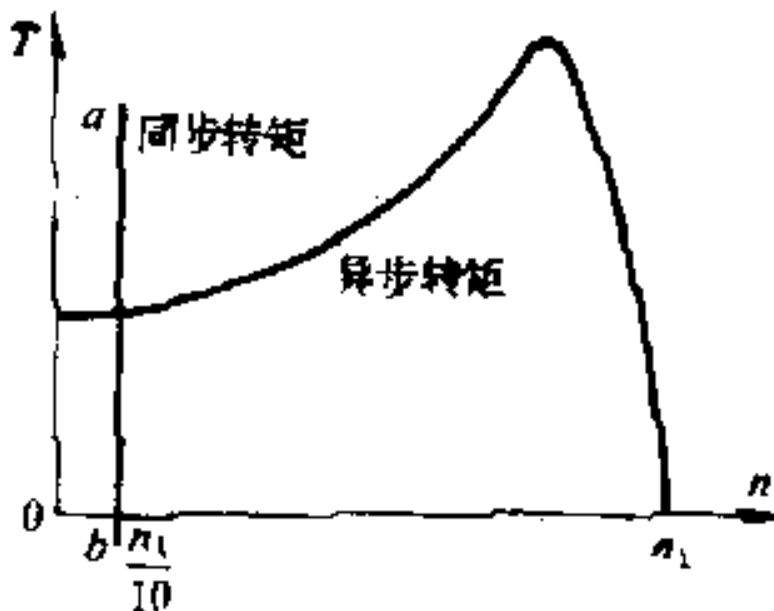
$$v_{Z1} = \frac{Z_1}{p} \pm 1 = \frac{36}{2} \pm 1 = 19(\text{正转}), 17(\text{反转})$$

$$v_{Z2} = \frac{Z_2}{p} \pm 1 = \frac{40}{2} \pm 1 = 21(\text{正转}), 19(\text{反转})$$

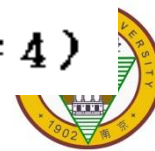
转速 $-(n_1-n)/19+n$

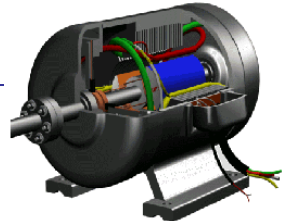
$$\frac{n_1}{19} = n - \frac{n_1 - n}{19}$$

$$n = \frac{n_1}{10} \quad \text{产生同步转矩}$$



$$(Z_1 = 36, Z_2 = 40, 2p = 4)$$





削弱和消去附加转矩的措施

减小谐波磁场的大小，或削弱其作用

1. 适当的短距（如削弱5、7次谐波）

$$y=5/6*\tau$$

2. 斜槽（削弱齿谐波）

一般斜度为一个定子槽距，这样定子齿谐波磁场在同一导条中各部分感应电势相互抵消

3. 槽配合

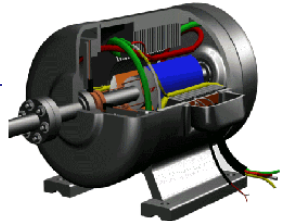
不应出现 $\frac{Z_1}{p} \pm 1 = \frac{Z_2}{p} \pm 1$ 即: $Z_1 = Z_2$, $Z_1 - Z_2 = 2p$

4. 减少气隙磁导的变化（如半闭口槽或闭口槽）

5. 增大气隙

增大气隙可以有效地削弱高次谐波和齿谐波磁场，随之减少附加转矩，但是过大的气隙使励磁电流增加，功率因数下降





制约起动的因素

• 供电系统的容量

供电容量比异步电动机的容量大得多，允许电动机在额定电压下直接起动。供电变压器的容量与异步电动机容量相差不是很大，则应采取降压措施以限制起动电流

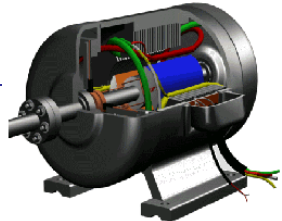
• 负载的性质

恒定大负载、恒定小负载、变负载（与转速平方上升）

• 起动的频繁程度

对于起动频繁的电动机，要求容量小于变压器容量的
20%才能全压起动





降压起动

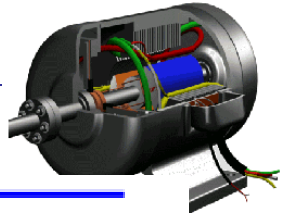
起动时，施加低于额定电压的电压。电动机的转速上升到接近额定转速后，再切换到额定电压下运行。

作用：限制起动电流、起动转矩按电压的平方而下降

应用：适用于对起动转矩要求不高的场合，如风机、离心泵电机等。

常用方法：自耦变压器起动、星形-三角形起动、延边三角形起动、串电抗器起动





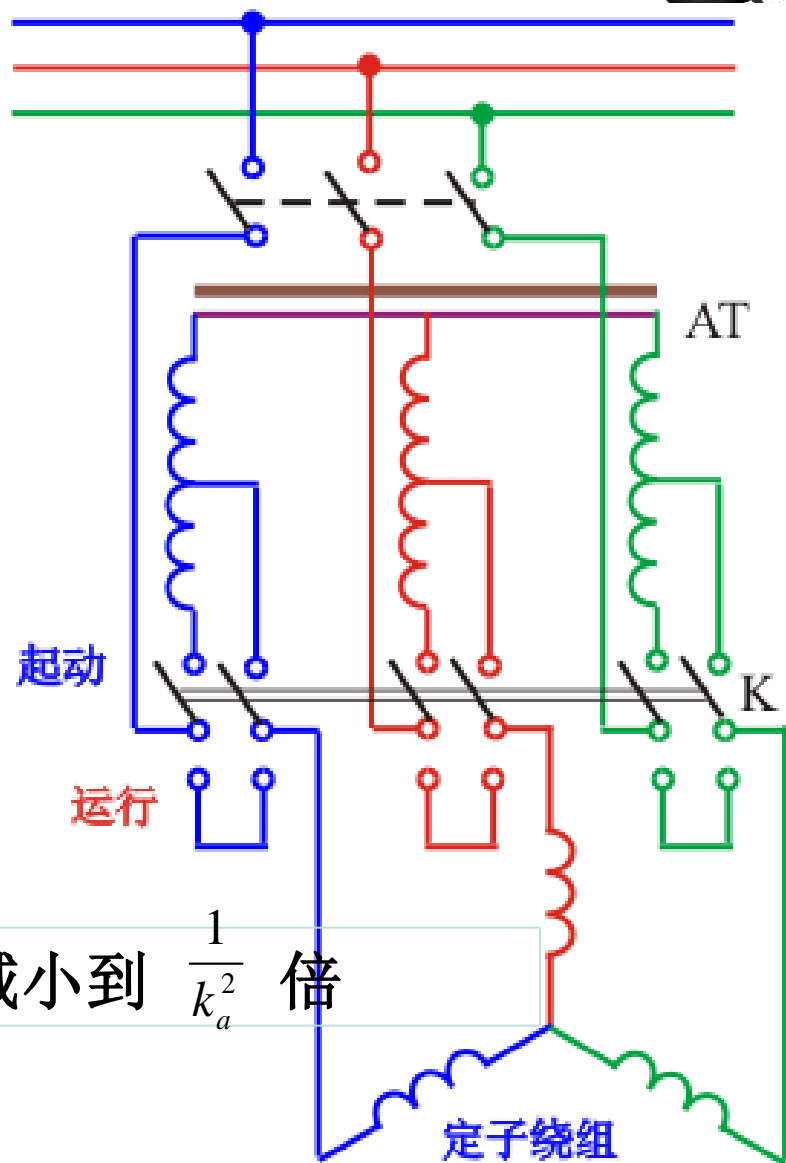
自耦变压器降压起动

设在额定电压下直接起动时，起动电流为 I_{st} 。

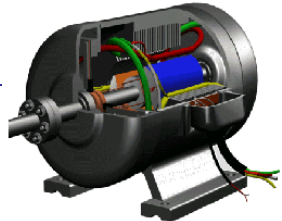
自耦变压器的变比为 k_a

起动时电压降低到 $1/k_a$ 倍，电动机的起动电流相应减小到 $1/k_a$ 倍。

$$I_{2st} = \frac{1}{k_a} I_{st} \quad T_{st} = \frac{1}{k_a^2} T_{st\text{直接}}$$



电网供给的起动电流比直接起动时减小到 $\frac{1}{k_a^2}$ 倍



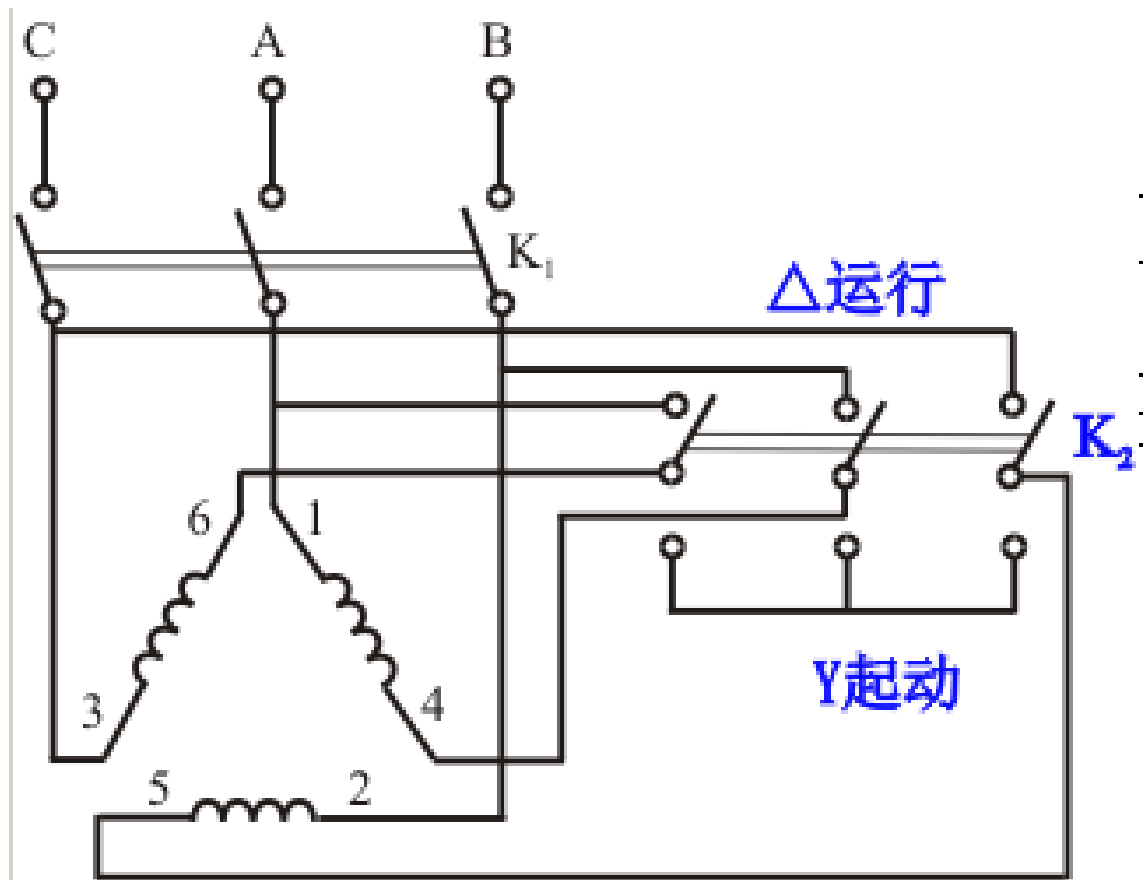
星形-三角形起动

三角形连接直接
起动时起动电流

$$I_{\Delta} = \sqrt{3} \frac{U}{Z}$$

星形连接起动，
起动电流

$$I_Y = \frac{U}{\sqrt{3}Z} = \frac{1}{3} I_{\Delta}$$



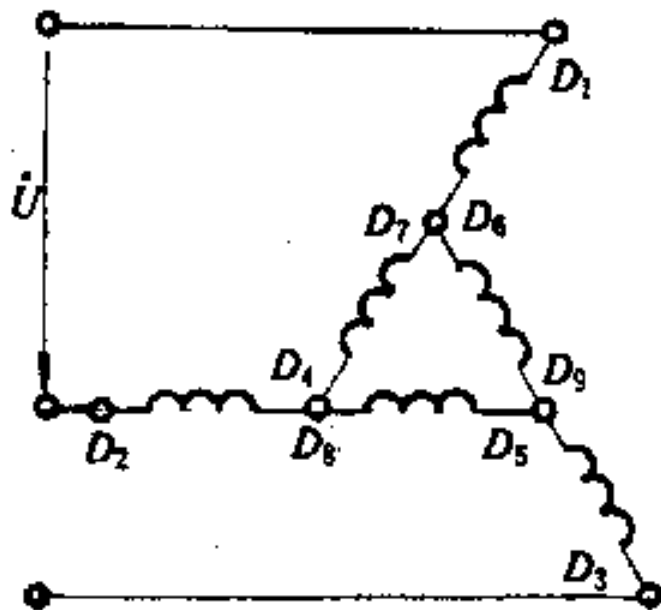
异步电动机Y—Δ角起动接线图

起动电流和转矩均减少为1/3

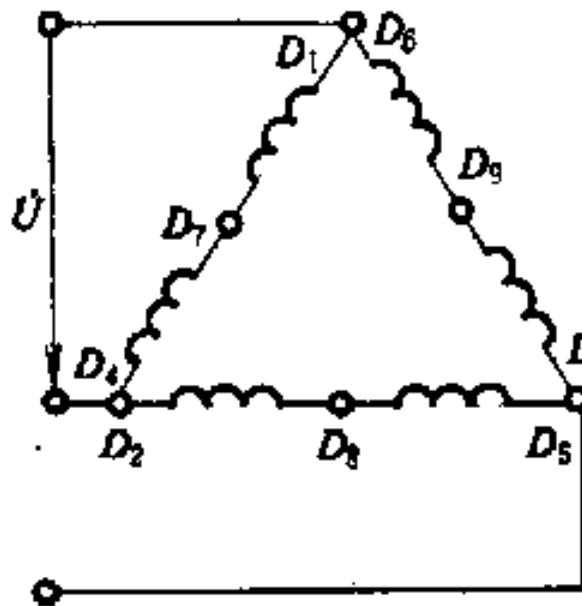




延边三角形



(a) 起动时接成延边三角形



(b) 运行时接成三角形

$\frac{N_Y}{N_\Delta}$ 越大，越接近 $Y-\Delta$ 起动

$\frac{N_Y}{N_\Delta}$ 越小，越接近直接起动





降压起动虽然可以限制起动电流，但
起动转矩也按电压的平方而减小

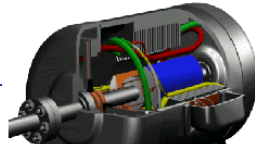
增大起动时的转子电阻是十分有效的方法，但正常运行时转子电阻大会使
效率降低

$$I_{st} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

$$T_{st} = \frac{m_1 p}{\omega_1} U_1^2 \frac{r_2'}{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}$$

想办法做到起动时转子电阻大，正常运行时转子电阻小，需要设计新的转子结构





深槽式异步电动机

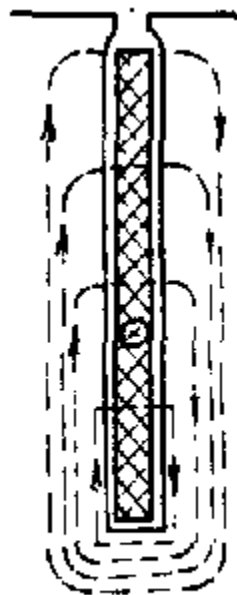
1. 起动时

在刚起动时， $f_2=f_1$ 。频率较高，导体漏抗大于电阻，漏抗占主要成分，槽电流的分布近似与漏抗成反比。槽底部分漏抗较大，该部分电流较小。愈接近于槽口漏抗愈小，该部分电流较大——**集肤效应**。

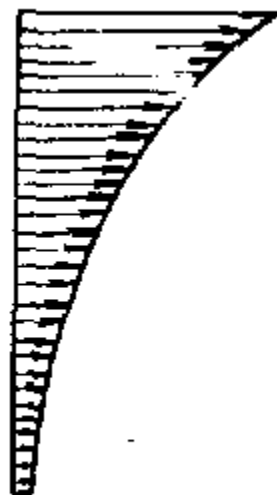
- 由于电流的分布不均匀，等效槽导体的有效面积减小——**集肤效应使槽导体电阻增加**；

- 集肤效应作用使槽漏磁通有所减少，转子漏抗也有所减少，二者均促使起动转矩增大，改善了起动特性。

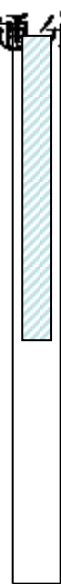
- 启动瞬间，由于磁路饱和，转子漏抗将明显减小。



漏磁通分布

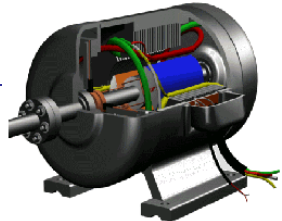


起动时电流密度的分布



等效截面





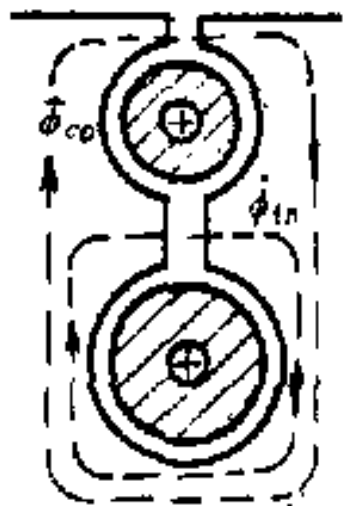
2. 正常运行时

- 正常运行时，由于转子电流的频率很低，槽导体的漏抗比电阻小得多，槽中电流将依电阻而均匀分布，转子电阻恢复到固有的直流电阻。
- 由于槽深而窄，转子漏抗较普通鼠笼式转子漏抗大——功率因数及过载能力有所降低。

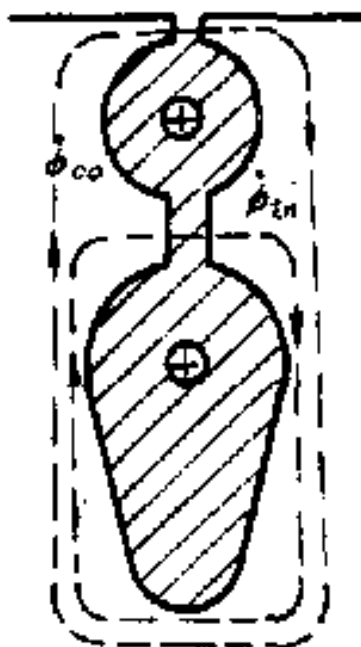




双鼠笼异步电动机



(a) 铜条转子



(b) 铸铝转子

外笼 Top bar:

截面小，电阻大

内笼 Bottom bar:

截面大，电阻小

内笼交链的漏磁通比外笼多，漏抗也大



1、起动时

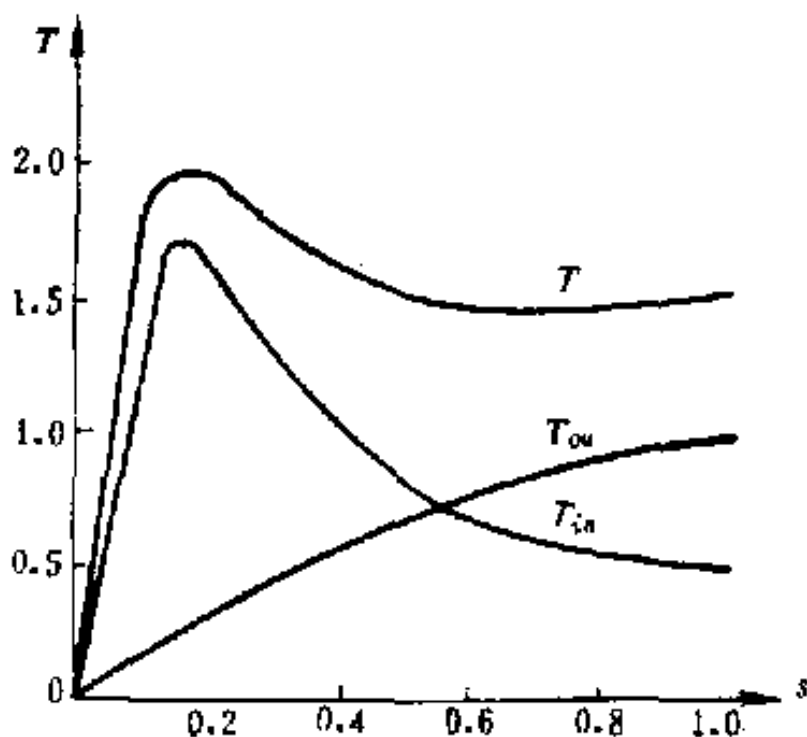
- 转子电流的频率 $f_2=f_1$ ，转子漏抗大于转子电阻，电流分配决定于漏抗。
- 内层鼠笼有较大的漏抗，电流较小，功率因数较低，所产生的电磁转矩也较小。
- 外层鼠笼仅有非常小的漏抗，电流较大，且电阻较大，起动时所产生的电磁转矩也较大。外层鼠笼又称起动鼠笼。

2、起动后

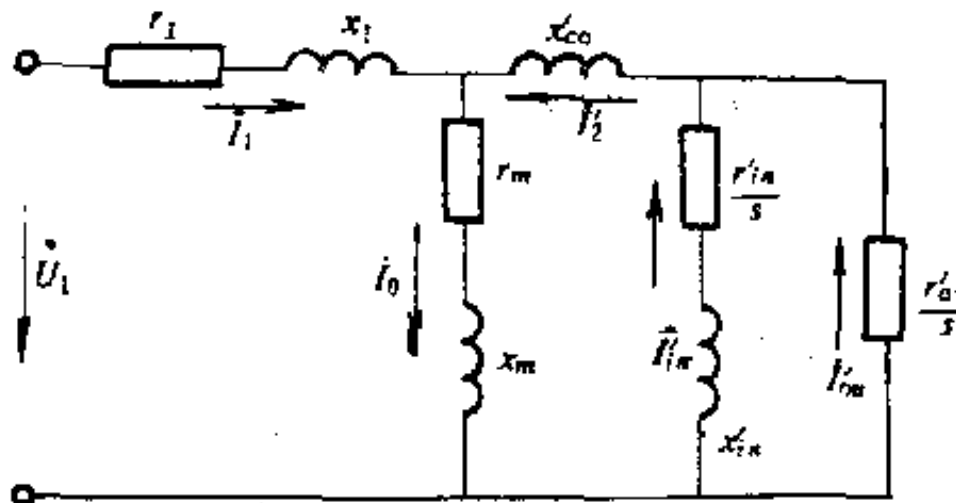
- 转子电流的频率很小，内层鼠笼的漏抗很小，两个鼠笼转子的电流分配决定于电阻。
- 内层鼠笼电阻较小，电流较大，运行时在产生电磁转矩方面起主要的作用，内层鼠笼称为运行鼠笼。

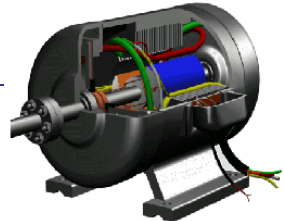


双鼠笼机械特性与等效电路



设内层鼠笼的电阻和漏抗为 r'_{in} 和 x'_{in} ,
外层鼠笼的电阻为 r'_{ou} , 两层鼠笼
共同漏抗为 x'_{co}





异步电动机的转速

$$n = \frac{60f}{p} (1 - s)$$

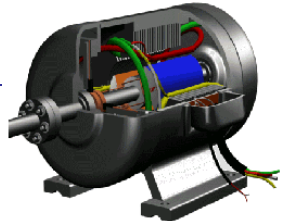
- (1) 改变供电电源的频率 f ;
- (2) 改变电动机的极对数 p —— 笼型转子电机;
- (3) 改变转差率 s : 改变外施电压 U ;

在转子回路中引入外加电阻;

在转子回路中引入附加电势。

其它: 齿轮减速等

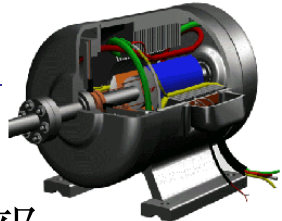




二、变频调速

- 改变供电电源的频率，可以改变转子的转速，为无级调速
- 变频调速时，**通常希望电动机的主磁通 Φ_m 保持不变**，因为增大 Φ_m 将引起磁路过分饱和，激磁电流大大增加，功率因素降低。如 Φ_m 太小，则电机容量得不到充分利用。
- 在改变频率的同时，**必须调节电压**，可根据不同负载要求，配以不同的 U_1/f_1 协调控制方式





三、变极调速

- 定子绕组需有特殊的绕法，使绕组的极对数能随外部接线的改变而改变。属于分级调速，具有两种不同转速的电动机称为双速电动机。（转子为鼠笼式）

- 变极电机定子绕组的绕制有两种方法：

1. 双绕组变极

- 定子上有两套极对数不同相互独立的绕组，每次运行只用其中一套
- 绕组设计较方便，但材料利用率较差，很少使用。

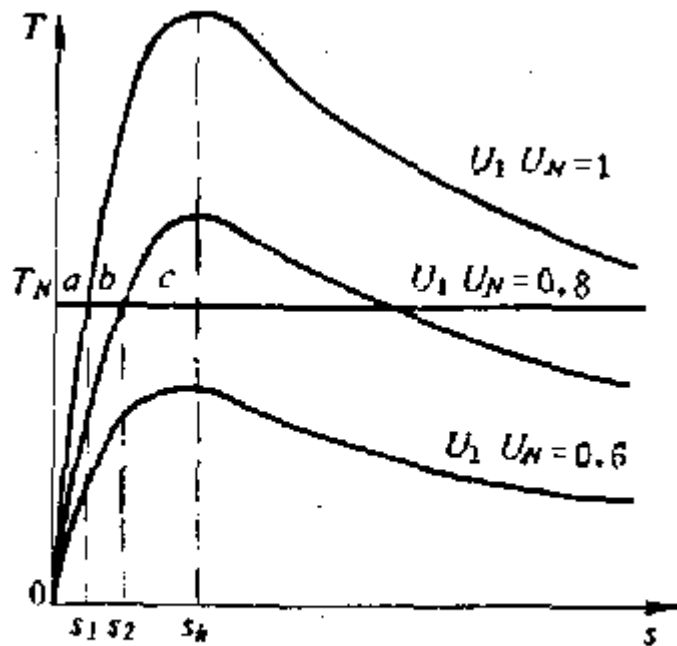
2. 单绕组变极

- 一套定子绕组，通过不同接法构成不同极对数。
- 变极电动机为鼠笼式转子，它可以随着定子极对数的改变而自动改变极对数。





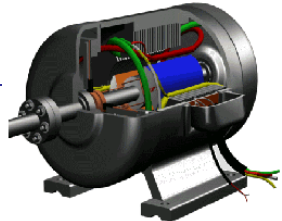
四、改变外施电压调速



(a) 普通鼠笼式异步电动机带恒转矩负载

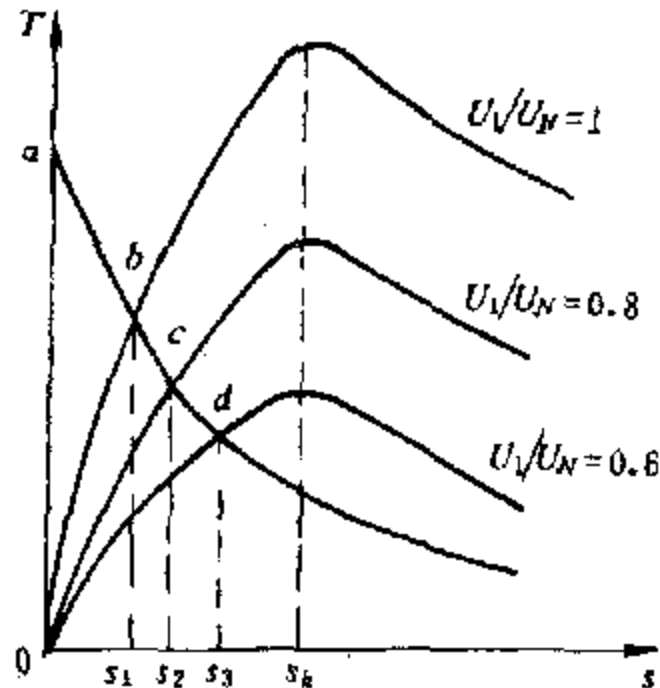
- 负载转矩 T 保持不变
 - 当外施电压 U_1 下降为额定值的 x 倍时， s 增加原有值的 $1/x^2$ 倍。
- 例：当 U_1 从 U_N 降低至 $0.8U_N$ 时，转差率便由原来的 $s_1=ab$ ，增加至 $s_2=ac$ ， s_2 应为 s_1 的 $1/0.8^2=1.56$ 倍。
- 普通鼠笼式异步电动机额定转差率很小，设 $s=0.04$ 。则 $s_2=0.062$ ，电动机的转速便由 $0.96n_1$ ，下降到 $0.938n_1$ ，调速范围很小。
 - 带恒转矩负载时不适宜采用调压调速方法。





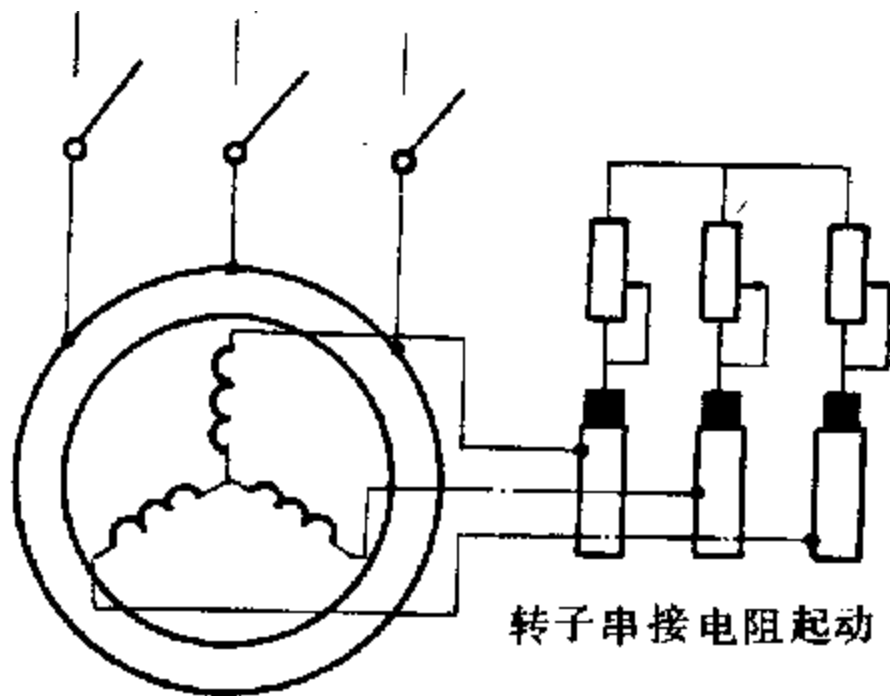
负载性质为变转矩时:

- 异步电动机转子电阻大, 有较软机械特性, 稳定运行区域较宽
- 如果带风机、泵类机械, 其负载转矩与转速平方成正比, 即 $T = kn^2$
- 采用调压调速可以获得较大的调速范围, 取得明显的节能效果。



(b) 高转差异步电动机带风机类负载





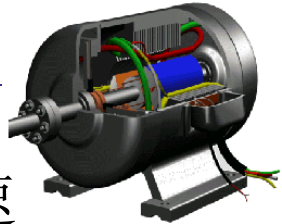
- 如 $s_k=1$ ，则起动转矩等于最大转矩

$$s_k = \frac{c_1(r_2' + r_{\Delta}')}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2}}$$

- 起动变阻器的电阻值 r_{Δ}'

$$r_{\Delta}' = \frac{1}{c_1} \sqrt{r_1^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2} - r_2'$$





1. 起动开始时，使全部电阻均串入转子回路，随着转速的上升，电磁转矩将减小。
2. 为了缩短起动时间，通常随转速上升分级切除部分电阻，使在整个起动过程中电动机保持有较大的电磁转矩。
3. 待起动完毕后，随着转子转速的升高，逐渐减少电阻运行。

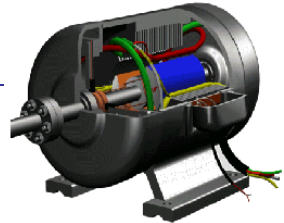
频敏变阻器：三相电感线圈

电阻值随频率的减小而自动减小

起动初时， $f_2=f_1$ ，涡流损耗大，等效铁耗电阻也大；

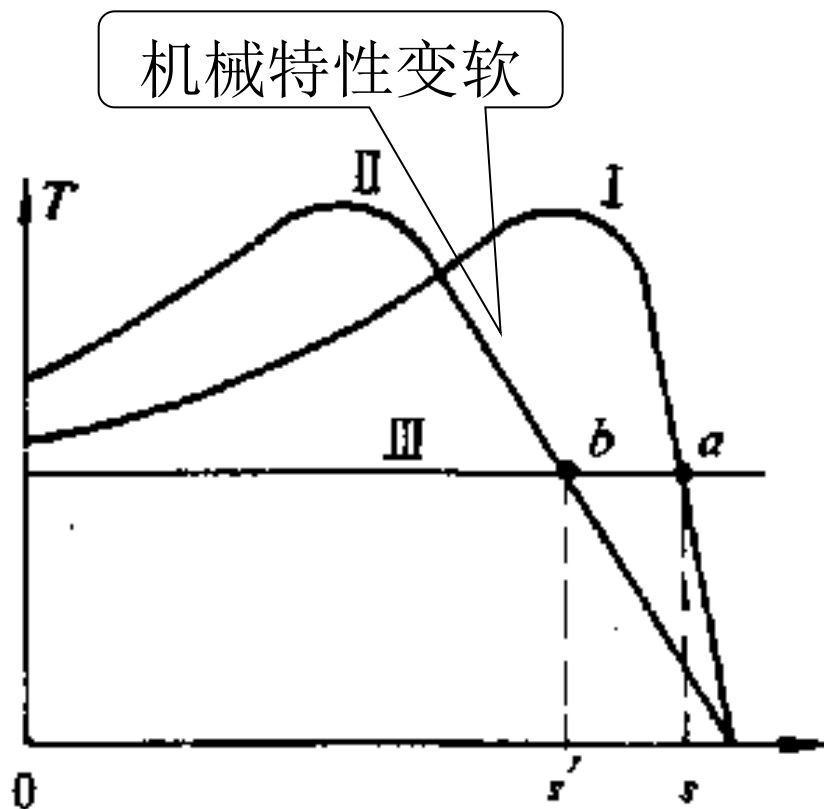
随着起动过程， $f_2=sf_1$ ，减小，转子电流频率降低，涡流损耗减小，等效铁耗电阻减小。





1. 在转子回路中接入变阻器调速

线绕转子异步电机转子回路中接入变阻器可以改变异步电动机的机械特性



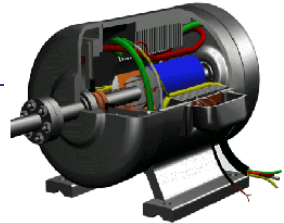
恒转矩

$$\frac{r_2}{s} = \frac{r_2 + r_{\Delta}}{s'}, \quad \text{即: } s' = \frac{r_2 + r_{\Delta}}{r_2} s$$

- 当负载转矩保持不变，接入变阻器后转子电流及转子电流的功率因数均保持不变，定子电流及输入功率也保持不变，而转速下降，导致转子铜耗增大，输出功率下降，效率也随效率降低。

例10-3 部分功率消耗在转子串联的电阻上，效率降低。





2. 串级调速

线绕转子异步电动机转子回路中接入附加电势实现调速

当转子回路串入与转子电势 sE_2 频率相同而相位相反的附加电势 E_f 后，转子电流 I_2

$$I_2 = \frac{sE_2 - E_f}{\sqrt{r_2'^2 + s^2 x_2'^2}}$$

